

Die große Kuppel von Florenz Ein Meisterstück des 15. Jahrhunderts

Peil, Udo

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 2005 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.23-34



J. Cramer Verlag, Braunschweig

Die große Kuppel von Florenz Ein Meisterstück des 15. Jahrhunderts*

UDO PEIL

Institut für Stahlbau, TU-Braunschweig
Beethovenstraße 51, D-38106 Braunschweig

Die große Kuppel von St. Maria del Fiore beherrscht mit ihrer klaren, himmelstürmenden Form das Stadtbild von Florenz, gleich aus welcher Richtung man sich der Stadt nähert (Bild 1). Dieser auch heute noch gültige Eindruck war wohl die Vision beim Entwurf einer Kuppel, von der zunächst keiner der Beteiligten wusste, wie und ob dieser Entwurf überhaupt realisiert werden könnte.



Bild 1: Stadtbild Florenz von der Piazzale Michelangelo

Im Jahre 1294 wird in Florenz nach dem ersten Entwurf und unter der Leitung von Arnolfo di Cambio mit dem Bau des neuen Doms begonnen, nachdem die vorherige romanische Domkirche St. Reparata der Stadt viel zu klein geworden ist. Arnolfo di Cambio ist Caputmagister, also der technische und gestalterische

* Vortrag gehalten am 15.01.2005 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

Kopf der opera del duomo, der Dombauhütte. Er baut parallel in Florenz an St. Croce und auch am Palazzo Vecchio. Für den Bau des neuen Doms wird St. Reparata und fast ein ganzes Viertel um den späteren Dom abgerissen, Straßen werden tiefer gelegt, um dem Dom ein würdiges und erhabenes Erscheinungsbild zu sichern.

Die Verantwortung für den Bau ist in der Hand der Handwerkszünfte der Stadt. Im Jahre 1331 übernimmt die wohlhabende Zunft der Wollhändler (Arte della Lana) die Leitung der Opera del Duomo. Diese bestellt im Jahre 1334 den Maler Giotto zum Caputmagister oder italienisch capomaestro. Giotto führt den Bau des eigentlichen Doms nicht weiter, wohl auch wegen der zwischenzeitlichen Diskussionen um die zukünftige Gestalt, sondern beginnt mit dem Bau des Campanile, der nach seinen Entwürfen eine Höhe von 122m haben sollte. Von dem heute 84m hohen Campanile wird aber bis zu seinem Tode nur das unterste Geschoss vollendet.

Im Jahre 1346 bricht ein Großteil der Finanzierung des Dombaus weg, da die Finanziere, die Bankhäuser Bardi und Peruzzi infolge der Zahlungsunfähigkeit des englischen Königshauses, bedingt durch den hundertjährigen Krieg zwischen England und Frankreich, bankrott gehen. Ein Jahr später kommt es noch schlimmer, Florenz wird von der Pest getroffen. In nur zwölf Monaten sterben vier Fünftel der Einwohner. Der Dombau geht in dieser Zeit so gut wie nicht weiter, erst 1355, also 59 Jahre nach der Grundsteinlegung sind die Wände und die Fassade des Langhauses fertiggestellt. Nach weiteren elf Jahren, im Jahre 1366, ist auch das Langhaus überdacht.

Die Planung der Kuppel tritt nun in eine entscheidende Phase. Bisher ist immer noch völlig unklar, wie die eigentliche Kuppel aussehen oder auch gebaut werden soll. Die Opera del Duomo beauftragt deshalb den capomaestro Giovanni di Lapo Ghini, ein Modell der geplanten Kuppel einschließlich Langschiff zu bauen. Lapo Ghinis Modell ist dem Geschmack seiner Zeit verhaftet, der italienischen Gotik mit dünnen Mauern, Strebepfeilern und Bögen zum Abstützen der Kuppel. Dieser Entwurf stößt jedoch auf vielfache Kritik, er ist den Florentinern zu sehr mit dem Geschmack der traditionellen Feinde von Florenz verbunden, den Mailändern, den Deutschen und Franzosen, den Goten eben, die halb Europa mit ihrem Baustil überzogen hatten. Die Opera del Duomo gibt deshalb bei Neri di Fioravanti, dem Erbauer des Ponte Vecchio über den Arno, ein zweites Modell in Auftrag. Der Entwurf von Neri di Fioravanti enthält keine gotischen Elemente mehr, gleichzeitig wird die Kuppel noch einmal deutlich vergrößert.

Jedes Gewölbe oder jede Kuppel erzeugt am unteren Rand horizontale Schubkräfte, die vom Unterbau aufgenommen werden müssen, sonst ist die Kuppel nicht tragfähig. Bild 2 macht dies deutlich. Die radial nach außen wirkende Horizontalkraft der „Menschenkuppel“ wird durch die Reibung zwischen Fuß



Bild 2: Kuppelsimulation

und Boden in den Erdboden übertragen. Wenn die Turner Rollschuhe trügen, die Horizontalkraft also nicht aufgenommen werden könnte, würde die Konstruktion versagen.

Neri di Fioravanti geht von der Überlegung aus, die horizontalen Kräfte mit einem Ring aus Eisen oder Holz aufzunehmen (Bild 3).

Bisher war noch nie eine Kuppel solchen Ausmaßes errichtet worden. Es war völlig unklar, ob die Lösung überhaupt funktionierte. Berechnungen oder ähnliches, wie es heute üblich ist, gab es nicht. Dennoch entschied sich die Opera del Duomo nach einem öffentlichen Referendum für diesen Entwurf. Das war

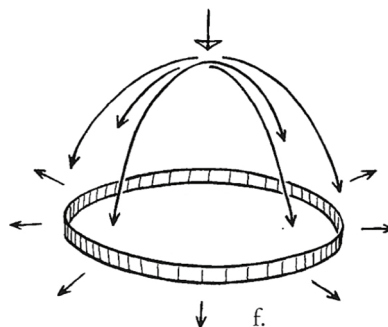


Bild 3: Ring zur Aufnahme der Kuppelschubkräfte [8]

ein mutiger Entschluss. Die Frage, die sich hier stellt, ist: Stand die Größe im angemessenen Verhältnis zum Risiko, oder anders gefragt, was mag das Motiv für den Mut gewesen sein?

Die Antwort liegt wohl in der zahlenmäßigen Abstimmung des Neri-Entwurfs, der vollständig der mittelalterlichen Zahlenmystik entsprach. Zahlen waren für die Menschen des Mittelalters etwas Wesenhaftes, sie hatten eine innere Kraft. Die Zahl 3 gehörte z. B. zur Trinität, die 4 zu den 4 Erzengeln, den 4 Elementen, den 4 Himmelsrichtungen. 3×4 ergibt 12, 12 zum Quadrat ist 144. Die Mauern der biblischen Stadt Jerusalem waren 144 Ellen hoch (Apokalypse des Johannes 21,17). Sich mit den richtigen Zahlen zu verbünden, hieß, sich richtig in die Schöpfung, in den Kosmos einzufügen.

Die mittelalterlichen Baumeister wollten (oder konnten) nur mit ganzen Zahlen rechnen (vorzugsweise mit geraden Zahlen). Neri's Entwurf war weitgehend nur mit geraden Zahlen realisiert: der Durchmesser beträgt 78 Ellen, die Kuppelbreite 72 Ellen, die äußere Segmentlänge beträgt 30 Ellen, die Kuppelhöhe beträgt wie die Länge des Langschiffes 144 Ellen (Bild 4).

Der Entwurf wurde begeistert aufgenommen, das Neri-Modell wurde zu einem Gegenstand allgemeiner Verehrung. Jedes Jahr mussten die capomaestri schwören, diesen Entwurf exakt zu verwirklichen. Neri hatte die Kuppel doppel-schalig, aber nicht als Halbkugel ausgebildet, sondern steiler, himmelstürmender (Bild 5). Gleichzeitig verringern sich dadurch auch die horizontalen Kuppelschubkräfte.

Völlig ungeklärt war indessen immer noch die Frage, wie die Kuppel gebaut werden sollte. Eine Einrüstung schied bei einer Höhe von fast 100m aus, man hätte ca. 700 große und dicke Baumstämme benötigt, dies war nicht machbar. Es gab eine Reihe kurioser Vorschläge. Einer bestand darin, den Innenraum mit Sand zu füllen, so dass die Kuppel oben auf dem Sandbett gebaut werden konn-

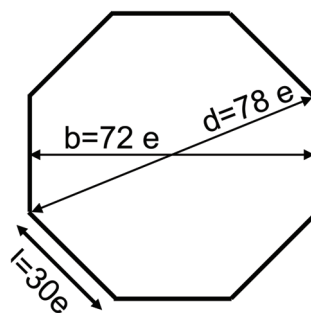


Bild 4: Kuppelmaße



Bild 5: Kuppel

te. Der Sand sollte mit Silbermünzen durchsetzt sein, um die Florentiner Bürger zu stimulieren, den Sand wieder heraus zu holen.

In dieser Situation entschied sich die Opera del Duomo dazu, einen Wettbewerb um den Bau der Kuppel auszuschreiben. Der Gewinner sollte 200 Goldflorinen erhalten, das war ein mehrfaches Jahresgehalt eines gut verdienenden Handwerkers. Gewinner des Wettbewerbs war der vierundzwanzigjährige Filippo Brunelleschi, ein gelernter Goldschmied, der die Opera del Duomo u.a. mit einer trickreichen perspektivischen Ansicht des Baus überzeugt hatte. Brunelleschi war ein genialer Mann, sehr beredsam, er sprach Latein wie seine Muttersprache. Seine Leidenschaft war die Geometrie, die Mathematik und alles Mechanische. Er gilt als der Erfinder der Zentralperspektive. Das Studium der Baukunst begann er autodidaktisch anlässlich einer Studienreise nach Rom, wo er alle großen Bauwerke analysierte.

Der Entwurf der Kuppel von Brunelleschi hielt sich streng an die Vorgaben von Neri di Fioravanti. Die zweischalige Kuppel bestand aus Mauerwerk: der eigentlich tragenden inneren und der mehr dem Witterungsschutz dienenden äußeren Kuppel. Zwischen beiden befindet sich ein Aufstieg bis hoch zur Laterne. Die acht Ecken des Oktogons werden durch acht Hauptrippen gebildet, die

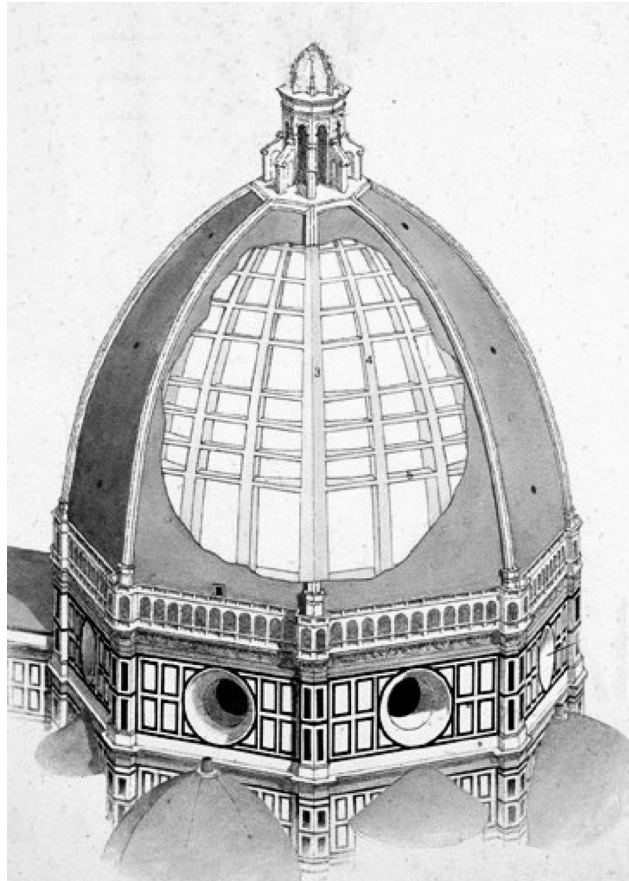


Bild 6: Kuppel mit teilweise geöffneter äußerer Dachschale

jeweils auf einem Hauptpfeiler stehen, siehe Bild 6. Sechzehn Nebenrippen stehen auf dem sog. Tambour (wegen der Trommelform), der die Kräfte in die Hauptpfeiler weiterleitet. Der Tambour enthält große kreisförmige Fenster zur Belichtung. In der Kuppelspitze ist eine Laterne angeordnet, die Luft und Lichtzufuhr sicherstellt. Unterhalb des Tambours sind Seitenkapellen angeordnet, die den radialen Horizontalschub der Kuppel mit aufnehmen sollen. Bild 7 zeigt eine Entwurfszeichnung Brunelleschis, die als Plakat im Museo del Opera del Duomo – dessen Besuch ein Muss ist – direkt hinter dem Dom erhältlich ist.

Da ein Bau der Kuppel auf einem Gerüst, wie es bisher immer gemacht wurde, nicht möglich ist, entschließt sich Brunelleschi, die Kuppel freitragend vom

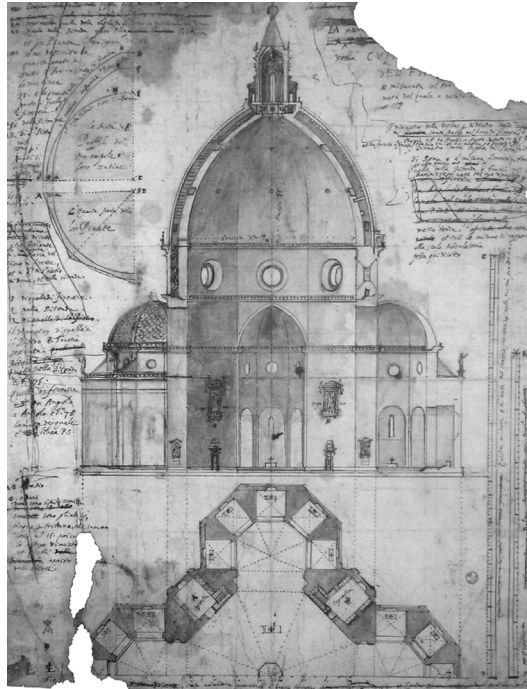


Bild 7: Entwurfszeichnung von Brunelleschi

Tambour her Schicht für Schicht aufzubauen. Dies setzt freilich einige Überlegungen voraus. Zum Verständnis des Tragverhaltens ist es nützlich, wenn man zwischen dem Tragverhalten während des Baus und dem endgültigen Tragverhalten im Endzustand mit Laterne unterscheidet.

Während des Baus ist das Tragverhalten durch einen räumlichen Kraftzustand gekennzeichnet, siehe Bild 8, Bild 2 macht das Tragverhalten zusätzlich deutlich, die Druckkräfte in Bild 8 sind die Druckkräfte in den Armen der Gruppe. Im Endzustand mit aufgesetzter Laterne dominiert das Verhalten einer Rippenkuppel, bei der die Last über vier sich kreuzende Bögen zu den acht Pfeilern abgetragen wird, vgl. Bild 9.

Durch die zunehmende Neigung der Kuppel zur Laterne hin wird das Mauerwerk der Kuppel durch sein Eigengewicht zunehmend auch senkrecht zur Mauerwerksebene beansprucht, bei sehr flacher Neigung würde das Mauerwerk möglicherweise nach innen einbrechen. Ideal zum Abtragen der senkrecht zum Mauerwerk wirkenden Kräfte wäre eine kreisrunde Kuppel. Kreisrunde Konstruktionen sind perfekt geeignet, radiale Druckkräfte abzutragen vgl. das Hüh-

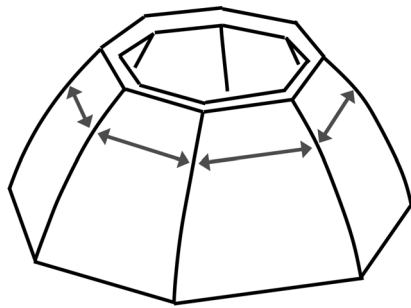


Bild 8. Tragverhalten Bauzustand

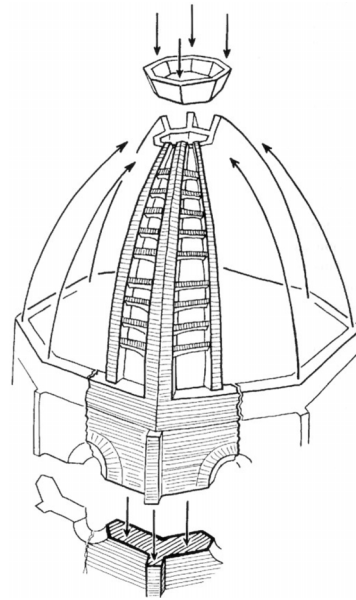


Bild 9: Tragverhalten Endzustand [2]

nerlei, das während des Legevorgangs sehr großen Druckkräften ausgesetzt ist. Ähnlich ist es mit Rohren im Erdreich, die allseits gedrückt werden.

Hier setzt nun die geniale Idee Brunelleschis an, mit dem der Baumeister seiner Zeit weit voraus war. Wenn es gelingt, das Oktogon so zu gestalten, dass sich im Mauerwerk aufeinanderliegende Ringe (mit nach oben abnehmendem Durchmesser) ausbilden können, trägt jeder einzelne Ring seine radialen Druckkräfte in sich ab, es tritt nur eine Druckbeanspruchung im Mauerwerk auf, das Einbrechen des Mauerwerks wird verhindert. Die Mauerwerksbereiche, die außerhalb des Rundbogens liegen, stellen bei dieser Betrachtung totes Material dar, das nicht mitträgt.

Man erkennt in Bild 10 oben, dass die innere Ringseite am Knick jeweils eng am Innenrand verläuft, wogegen die äußere Ringseite die Seitenmitte berührt. Die Ringmitte liegt also am Knick (bei Punkt A) dichter an der Innenkante als in Seitenmitte (bei Punkt B). Da die Kuppel schräg ansteigend gemauert ist, liegt Punkt B höher als Punkt A, vgl. Bild 10 unten. Bei paralleler Ausführung des Mauerwerks mit gerader oberer Kante (wie es üblich ist) würde unser gedachter Ring also girlandenartig von den Kanten (Punkt A) zu den Seitenmitten (Punkt B) ansteigen (Bild 11), dies ist aber kein Kreisring mehr, ein solcher geknickter Ring würde bei äußeren Druckkräften „zusammengefaltet“ werden. Um den Ring

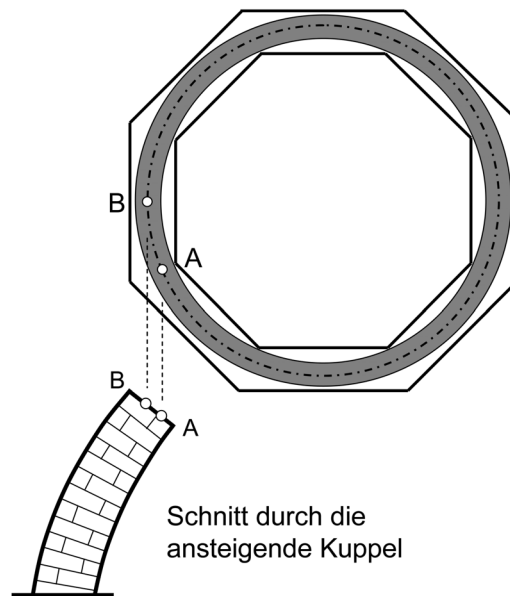


Bild 10: Schnitt durch die ansteigende Kuppel

eben zu halten, muss also das Mauerwerk zwischen den Kanten um den Höhenunterschied zwischen Punkt B und Punkt A abgesenkt werden. Die entstehende Girlandenkurve entspricht übrigens auch der Kurve, die ein Bleistift beim Anspitzen am Übergang vom sechseckigen Schaft auf den angespitzten Kegel zeigt, auch dort wird der (sechseckige) Bleistift in die Ringform des Spitzers gezwungen.

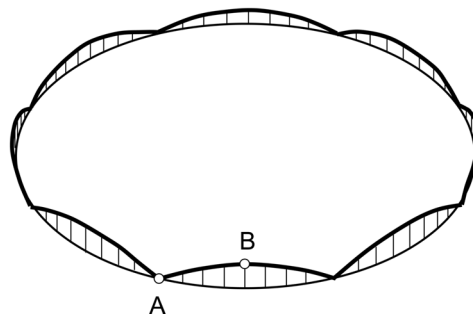


Bild 11: Veränderung des Kreisrings bei paralleler Mauerung

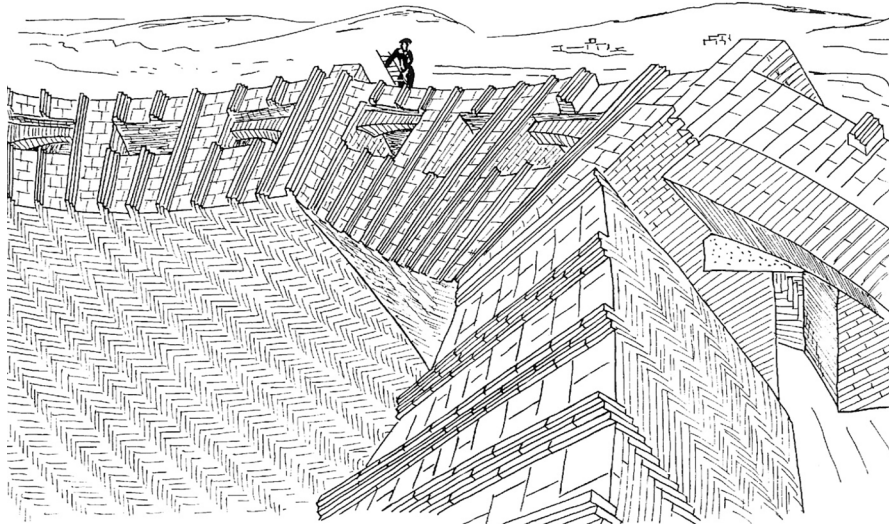


Bild 12: Kuppel im Bauzustand [2]

Um den genannten, günstigen Kreisringtrageffekt auch bei den äußeren horizontalen Rippen zu ermöglichen, wurden von Brunelleschi Ausrundungen der horizontalen Rippen im Bereich der Kanten vorgesehen, so dass sich auch dort ein Ring einstellen kann. In Bild 12 ist dies rechts erkennbar.

Bild 12 zeigt eine zeichnerische Rekonstruktion der Kuppel in einem Bauzustand. Man erkennt, dass Brunelleschi das Mauerwerk tatsächlich so gestaltet hat, dass die Bereiche zwischen den Kanten des Oktogons girlandenartig durchhängen.

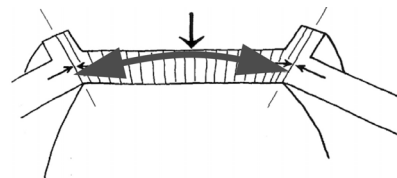
Ein weiteres Problem trat beim Bau der Kuppel dadurch auf, dass bei flacher werdender Neigung die Ziegellagen im Mörtelbett abrutschen können. Um dies zu vermeiden, verwendete Brunelleschi eine spezielle Form des Mauerwerks, ein Fischgrätmuster. Einige Steine wurden vertikal gestellt, die Nachbarsteine wieder horizontal gelegt, vgl. Bild 13.

Die horizontal liegenden Ziegel können sich beim Mauern gegen die bereits vertikal stehenden verkeilen, so dass sie nicht herunterrutschen. Gleichzeitig wird durch die Art des Mauerwerkes die Bildung eines Druckgewölbes in ihm ermöglicht, so dass keine gefährliche Zugbelastung in den Mörtelfugen auftritt, vgl. Bild 14.

Durch die Besonderheiten des Entwurfs sind die horizontalen Kuppelschubkräfte klein gehalten worden. Dennoch sind umlaufende Zugringe erforderlich, vgl.



Bild 13: Frischgrät-Mauerwerk



Keilförmige Anordnung trägt !

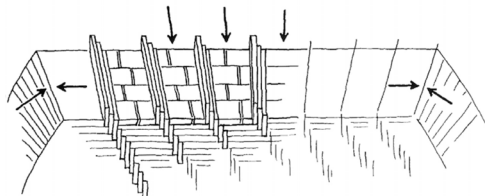


Bild 14: Günstige Mauerwerksform [2]

Bild 3. Brunelleschi sieht hierfür umlaufende oktagonale Natursteinbänder vor, die mit Eisenhaken verbunden werden. Zusätzlich werden Holzringe eingebaut.

Für den Bau der Kuppel wurden von Brunelleschi große Kräne entworfen und gebaut. Angeblich wurde jede einzelne Ziegel von ihm persönlich begutachtet. Pro Woche wurde eine Ziegellage gemauert, die dann ausreichende Festigkeit zur Aufnahme der nächsten Lage hatte. Über 300 Personen arbeiteten am Dom von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang. Küchen, Toiletten etc. waren oben vorhanden. Dennoch war das Leben hart, gezahlt wurde nur, wenn gearbeitet wurde. Der Lohn war niedrig, wer sich verletzte, musste damit selbst fertig werden. Die Zahl der Unfälle war allerdings sehr gering, dank der Vorsichtsmaßnahmen Brunelleschis waren nur drei Todesopfer zu beklagen.

Am 30. August 1435 wurde St. Maria del Fiore durch Papst Eugen eingesegnet, der vor dem römischen Pöbel, der ihn wegen seiner kontinuierlichen Kriege attackierte, nach Florenz geflohen war. In Begleitung von 7 Kardinälen, 37 Bischöfen, 9 Mitgliedern der Florentiner Regierung sowie von Cosimo de Medici begab sich Papst Eugen von seiner Residenz in St. Maria Novella (gegenüber dem heutigen Bahnhof) zum Dom. Für die letzten 300 Meter hatte man ein Holzgerüst gebaut, um den Papst dem Pöbel zu entrücken. Vorher hatte man bei solchen Gelegenheiten Münzen zur Ablenkung unter das Volk geworfen. Mehr als hunderttausend Menschen nahmen begeistert an der Einsegnung teil.

Diese Einsegnung war der Beginn einer neuen Zeit: das Mittelalter war vorüber. Brunelleschi starb am Karfreitag, dem 15. April 1451. Er wurde von den Florentinern im Dom, in der Cripta di St. Reparata beerdigt, eine Ehre, die nicht einmal Michelangelo zuteil wurde. Brunelleschis Werk war grandios, es ist vielleicht mit dem von Kolumbus vergleichbar, der ebenfalls – nur gestützt auf sein profundes Wissen und seinen Mut – Grenzen überschritt, die zuvor niemand auch nur berührt hatte.

Literatur

- [1] ROSS, K.: Das Wunder von Florenz. Architektur und Intrige: Wie die schönste Kuppel der Welt entstand. A. Knaus-Verlag, München, 2003
- [2] KRÄMER, T.: Die große Kuppel von Florenz. Verlag Freies Geistesleben. Stuttgart, 2001.
- [3] GALLUZZI, P.: Renaissance Engineers. From Brunelleschi to Leonardo da Vinci. Istituto e Museo di Storia della Scienza, Florence. 1st Edition, 1996.
- [4] SETTLE, T.B.: Brunelleschi's horizontal arches and related devices. Annali dell'Istituto e Museo di storia della scienza di Firenze, 1978, S. 65-80.